

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Аннотация

Предложенная статья посвящена созданию математической модели процесса выгорания факела газообразного топлива, адекватной процессу в широком диапазоне изменения параметров. Проанализировав процесс выгорания топлива в факеле, установлены закономерности распределения температуры газового потока и материала по всей длине печи, а также выявлены условия оптимизации процесса сжигания топлива. При проведении расчетов определено, что доля выгоревшего топлива по длине факела существенно зависит от коэффициента избытка дутья (расхода воздуха на единицу топлива). Были проведены исследования, которые показали, что отклонение коэффициента избытка дутья от оптимального значения на величину $\pm 0,1$ приводит к уменьшению теплового потока от факела на поверхность нагрева до 10 %, что говорит о значительном увеличении расхода топлива.

Ключевые слова: моделирование, промышленные печи, газообразное топливо, тепловой поток, эмпирические уравнения, математическая модель.

Abstract

The proposed article is devoted to the creation of a mathematical model of the combustion process of the gas fuel torch, adequate process in a wide range of parameter changes. After analyzing the process of burning fuel in the torch, the laws of temperature distribution of the gas flow and the material over the entire length of the furnace, as well as the conditions for optimizing the combustion process. During the calculations it was determined that the proportion of burnt fuel along the length of the torch significantly depends on the ratio of excess blast (air consumption per fuel unit). Studies have been conducted that have shown that the deviation of factor of surplus of air blast from the optimum value by the amount of ± 0.1 leads to a decrease in the heat flux from the flame on the heating surface of up to 10 %, indicating a significant increase in fuel consumption.

Key words: modelling, industrial furnaces, gaseous fuel, heat flux, empirical equations, mathematical model.

В настоящее время отопление большинства промышленных печей осуществляется газообразным топливом. Конструктивные и эксплуатационные параметры тепловых технологических агрегатов, используемых в металлургии и других отраслях промышленности, характеризуются широким разбросом, что затрудняет проведение сопоставительного анализа их работы.

При этом вопросы горения газообразного топлива в таких агрегатах исследованы не достаточно, что не позволяет провести анализ процесса выгорания топлива в факеле, и установить закономерности распределения температуры газового потока и материала по длине печей, а также условий оптимизации процесса сжигания топлива. Вследствие этого характеристики выгорания факела при расчетах агрегатов задаются по приближенным эмпирическим уравнениям, что снижает точность расчета и в конечном итоге приводит к потерям тепловой энергии

в промышленных агрегатах, что при непрерывно возрастающей стоимости топлива приводит к существенному снижению технико-экономических показателей.

Настоящая работа посвящена созданию математической модели процесса выгорания факела газообразного топлива, адекватной процессу в широком диапазоне изменения параметров, что приведет к обоснованным тепловым расчетам промышленных агрегатов. Существенное отношение длины факела к его поперечному сечению позволяет моделировать факел в одномерном пространстве.

В соответствии с результатами, представленными в [1, 2], условие непрерывности потоков газа и дутья в одномерном факеле описывается следующим уравнением

$$S \cdot W = S \cdot W + S \cdot \frac{\partial W}{\partial x} dx + S \cdot P_k \cdot W \cdot C_{O_2}^{mek} \cdot dx, \quad (1)$$

где S – поперечное сечение факела (потока), m^2 , W – объемная плотность потока газообразного топлива, $m^3/(c \cdot m^2)$, $C_{O_2}^{mek}$ – текущая величина объемной доли кислорода в данном поперечном сечении факела, m^3/m^3 , x – текущая координата факела, m , P_k – макроконстанта, определяющая линейную скорость выгорания топлива, $1/m$.

Для того чтобы найти решение этого уравнения, необходимо определить $C_{O_2}^{mek}$, как величину, зависящую от степени выгорания топлива в факеле. С этой целью вначале определим текущее значение коэффициента избытка дутья

$$\alpha_{mek} = \frac{V_{O_2}^{mek}}{W \cdot L_{O_2}^T} = \frac{V_{O_2}^0 - V_{O_2}^{израсх}}{W \cdot L_{O_2}^T} = \frac{\alpha \cdot L_{O_2}^T W_0 - L_{O_2}^T \cdot (W_0 - W)}{W \cdot L_{O_2}^T} = (\alpha - 1) \frac{W_0}{W} + 1, \quad (2)$$

где $V_{O_2}^0, V_{O_2}^{mek}, V_{O_2}^{израсх}$ – начальное, текущее и израсходованное значение плотности потока кислорода в факеле, $m^3/(c \cdot m^2)$, W_0 – начальное значение плотности потока топлива в факеле, $m^3/(c \cdot m^2)$.

На рисунке 1 приведены зависимости α_{mek} от величины соотношения W_0/W при различных значениях α . Исходя из этих зависимостей можно ожидать, что решение уравнения (6) будет носить разный характер для $\alpha = 1$ и для $\alpha > 1$, так как из (2) следует, что $\lim_{W \rightarrow 0} \alpha_{mek} = \infty$.

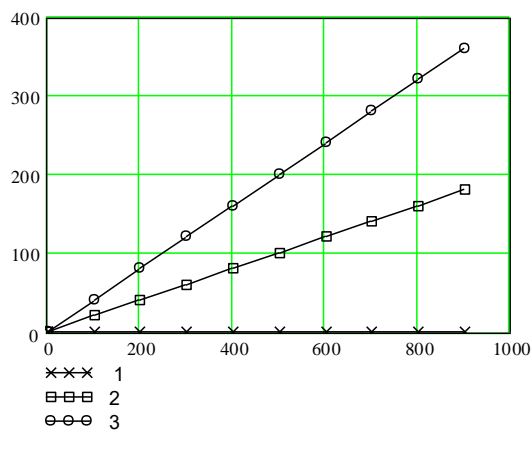


Рис. 1. Зависимость α_{mek} от соотношения W_0/W при различных значениях α (зависимость 1 для $\alpha = 1$; 2 – для $\alpha = 1,2$; 3 – для $\alpha = 1,4$)

Текущая концентрация кислорода в дутье определится следующим образом:

$$C_{O_2}^{тек} = \frac{V_{O_2}^{тек}}{V_{тек}} = \frac{L_{O_2}^T \cdot [(\alpha - 1) \cdot W_0 + W]}{(1 + \alpha \cdot L_{O_2}^T / \beta) \cdot W_0}, \quad (3)$$

где $V_{тек}$ – текущая плотность потока газов факела, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Определив из (2) $(\alpha - 1)$ и подставив в (3) получим

$$C_{O_2}^{тек} = \frac{\alpha_{тек} \cdot L_{O_2}^T}{1 + \frac{\alpha \cdot L_{O_2}^T}{\beta}} \cdot \frac{W}{W_0}. \quad (4)$$

При этом конечное содержание кислорода

$$\lim_{W \rightarrow 0} C_{O_2}^{тек} = \frac{\alpha - 1}{\frac{1}{L_{O_2}^{тек}} + \frac{\alpha}{\beta}}, \quad (5)$$

а объемная доля кислорода в начале факела составляет

$$C_{O_2}^{нач} = \frac{\alpha \cdot L_{O_2}^T}{1 + \frac{\alpha \cdot L_{O_2}^T}{\beta}}. \quad (6)$$

Заметим, что при сжигании твердых топлив доля кислорода $C_{O_2}^{нач}$ в начале факела для всех топлив одинакова и равна доле кислорода в дутье [1, 3]

$$C_{O_2}^{нач} = \frac{\alpha \cdot L_{O_2}^T}{\alpha \cdot L_{O_2}^T / \beta} = \beta, \quad (7)$$

где β – доля кислорода в дутье, $L_{O_2}^T$ – теоретический объем кислорода, необходимый для сжигания единицы топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В отличие от (7) для газообразного топлива эта величина в соответствии с (6) является переменной, зависящей от состава топлива, доли кислорода в дутье, коэффициента избытка дутья и от объема кислорода, необходимого для окисления компонентов единицы топлива. В этом заключается принципиальное отличие процессов факельного сжигания газообразного топлива, которое должно учитываться при расчете процессов горения.

Подставим значение $C_{O_2}^{тек}$ в уравнение (1) и после элементарных преобразований получим дифференциальное уравнение выгорания одномерного факела в следующем виде

$$\frac{dW}{dx} = - \frac{P_k [(\alpha - 1) \cdot W_0 + W]}{\left(\frac{1}{L_{O_2}^T} + \frac{\alpha}{\beta} \right) \cdot W_0} \cdot W, \text{ или} \quad (8)$$

$$\frac{dW}{\frac{1}{W_0} \cdot W^2 + (\alpha - 1) \cdot W} = - \frac{P_k \cdot dx}{\frac{1}{L_{O_2}^T} + \frac{\alpha}{\beta}}. \quad (9)$$

Решение этого уравнения в соответствии с [4] имеет вид:

$$W = W_0 \frac{(\alpha - 1) \cdot \exp(-B \cdot x)}{\alpha - \exp(-B \cdot x)} \text{ при } \alpha > 1, \quad (14)$$

где $B = \frac{P_k \cdot (\alpha - 1)}{\frac{1}{L_{O_2}^T} + \frac{\alpha}{\beta}}.$

Таким образом (14) является уравнением выгорания газообразного топлива. Решения для коэффициента избытка дутья $\alpha = 1$ и $\alpha < 1$ приведены в [4]. Они представляют в основном теоретический интерес, т.к. на практике топливо сжигают при $\alpha > 1$.

Из (14) следует, что доля выгоревшего топлива по длине факела существенно зависит от коэффициента избытка дутья (расхода воздуха на единицу топлива). При этом доля выгоревшего топлива достигает максимума в некоторой точке по длине факела, которую называют ядром факела. Исследования [5-8] показали, что отклонение коэффициента избытка дутья от оптимального значения на величину $\pm 0,1$ приводит к уменьшению теплового потока от факела на поверхность нагрева до 10 %, что приводит к значительному увеличению расхода топлива.

Список использованных источников

1. Воронин П.А., Давидсон А.М., Шлыкова С.В. Исследование горения твердых и жидких топлив на основе массообменных процессов в одномерном факеле // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1993. № 3-4.
2. Давидсон А.М., Воронин П.А., Шлыкова С.В. Исследование горения газообразного топлива на основе массообменных процессов в одномерном факеле // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1993. № 5-6.
3. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. – М.: Металлургиздат, 1960.
4. Рутковский А.Л., Мешков Е.И., Давидсон А.М., Зурабов А.Т., Ковалева М.А., Исследование процесса факельного сжигания газообразного топлива // Инженерно-физический журнал. 2009. Том 82. № 1.
5. Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами (монография). – М.: Теплоэнергетик, 2004.
6. Кавалеров А.Б. Тепловая работа пламенных металлургических печей. – Свердловск: Гос. НТИ литературы по черной и цветной металлургии. Свердловское отделение, 1956. – 368 с.
7. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 396 с.
8. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: справочник / Под. ред. Усачева А.Б. – М.: Черметинформация, 1999. – 185 с.